

На правах рукописи



Шека Андрей Сергеевич

**Модели, алгоритмы и программный комплекс
для обеспечения интеллектуального эксперимента**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена на кафедре алгебры и дискретной математики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель: Попов Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Корольков Юрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет», заведующий кафедрой прикладной алгебры и защиты информации Института математики, экономики и информатики;

Иванов Дмитрий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет», доцент кафедры алгебры и математической логики Института математики и компьютерных наук.

Ведущая организация: ФГБУН Институт математики и механики имени Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург

Защита состоится 20 июня 2014 в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 212.285.25 на базе ФГАОУ ВПО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51, зал диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



В. Г. Пименов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Начало активному изучению современной теории искусственного интеллекта было положено в работе [32]. К настоящему времени теория искусственного интеллекта является неотъемлемой частью таких областей знаний, как компьютерные науки, математическое моделирование, теория управления и многие другие.

Исследования в области интеллекта неразрывно связаны с исследованиями носителей интеллекта и коммуникационной среды. В случае исследований естественного интеллекта очевидными носителями являются люди, а коммуникационной средой — их среда обитания. При рассмотрении искусственного интеллекта возникает вопрос о создании как носителей искусственного интеллекта, так и подходящей среды для этих носителей. Необходимо учитывать, что разработка носителей и среды — это не элемент удобства изучения, а неотъемлемая часть создания искусственного интеллекта.

На сегодняшний день основным инструментом для проведения интеллектуального эксперимента принято использовать робототехнический полигон, на котором тестируются интеллектуальные алгоритмы. Исследования в области разработки и использования робототехнических полигонов в последние десятилетия отражены не только в многочисленных научных публикациях (см., например, [20, 24]), но и в крупномасштабных проектах на государственном уровне (см., например, [30, 44]). Большое внимание уделяется различным робототехническим соревнованиям (см., например, Robocup [38], Eurobot [23]). Журналом Artificial Intelligence [21] исследования в области интеллектуальных соревнований и полигонов выделяются в качестве самостоятельного научного направления. Проблематика построения и использования робототехнических полигонов по-прежнему актуальна, и для неё открыт вопрос разработки высокоэффективных математических моделей и алгоритмов для проведения интеллектуальных экспериментов.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и математических моделей для обеспечения интеллектуального эксперимента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить несколько задач, которые следуют из характерных особенностей робототехнического полигона для проведения интеллектуальных экспериментов. Управление роботом может происходить в ручном и автоматическом режимах; при этом полигон должен поддерживать оба режима. Ручной и автоматический режимы нуждаются в оборудовании полигона стационарной системой датчиков, которая осуществляет внешнее наблюдение за роботом и снабжает его навигационной информацией. В автоматическом режиме управление робота происходит с помощью некоторого алгоритма, который, как правило, исследуется в рамках проводимого интеллектуального эксперимента. При этом система управления робота должна автоматически уметь приводить его в известное состояние после проведения эксперимента, то есть локализовать, а также отслеживать нештатные ситуации, которые могут возникать в том числе из-за несовершенства иссле-

дуемого алгоритма. Таким образом, с модельной точки зрения возникают три задачи: обеспечение полигона стационарной системой датчиков, определение фактического состояния робота и отслеживание нештатных ситуаций. Ввиду прикладного характера данных задач, эффективность их решения необходимо проверять по результатам экспериментального тестирования, которое является самостоятельной задачей. Таким образом, для достижения цели диссертации потребовалось решение четырёх задач.

1. Разработка алгоритмов размещения датчиков для исследовательского окружения робота.
2. Разработка алгоритма оптимального решения задачи локализации робота.
3. Разработка модели самосознания робота, обеспечивающая эффективное отслеживание нештатных ситуаций.
4. Разработка программного комплекса, обеспечивающего проведение экспериментального тестирования предложенного математического аппарата.

Методология и методы исследования. В исследовании построены различные математические модели, основанные на графах, логических моделях, генетическом алгоритме, модели оптимизации искусственной физики и строковых последовательностях.

В настоящей работе использовались различные численные методы. В частности, нейронные сети, в том числе построенные на основе метода Рунге – Кутты, методы эволюционирования нейронных сетей, методы обработки и анализа статистических данных, генетические алгоритмы, алгоритм оптимизации искусственной физики.

Представленные алгоритмы и модели реализованы в комплексе программ, использующих технологии высокопроизводительных распределённых вычислений на основе системы гетерогенных многопроцессорных кластеров, парадигм объектно-ориентированного программирования и сервис-ориентированной архитектуры. Программный комплекс обеспечивает тестирование алгоритмов и моделей с использованием автоматизированных робототехнических полигонов.

Научная новизна. Все результаты диссертации являются новыми.

1. Впервые разработан эффективный алгоритм точного решения проблемы размещения датчиков, осуществляющих внешнее наблюдение.
2. Впервые разработан эффективный алгоритм точного решения проблемы размещения датчиков, обеспечивающих навигацию на основе триангуляции.
3. Для проблемы размещения датчиков, осуществляющих внешнее наблюдение, построен оригинальный приближённый алгоритм, использующий модель искусственной физики, в которой для вычисления силы применяется нейронная сеть Рунге – Кутты.
4. Впервые построен эффективный алгоритм точного решения проблемы нахождения минимального плана локализации.
5. Разработана алгебра временных отношений, оперирующая на порядок большим набором временных отношений, чем известные модели.
6. Построен генетический алгоритм с памятью о предыдущих итерациях.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сведение проблемы размещения датчиков, осуществляющих внешнее наблюдение, к проблемам выполнимости булевой функции, 3-выполнимости булевой функции, максимальной выполнимости булевой функции.
2. Сведение проблемы размещения датчиков для обеспечения навигации к проблемам выполнимости булевой функции и 3-выполнимости булевой функции.
3. Алгоритм приближённого размещения датчиков, осуществляющих внешнее наблюдение, основанный на модели оптимизации искусственной физики, в которой для вычисления силы используется нейронная сеть Рунге – Кутты.
4. Сведение проблемы построения плана локализации к проблемам выполнимости булевой функции и 3-выполнимости булевой функции.
5. Алгебра временных отношений, использующая компактное описание пространства «состояние-действие».
6. Усовершенствованный генетический алгоритм.

Научная и практическая значимость. Изложенные в диссертации теоремы, алгоритмы и математические модели представляют теоретическую значимость. Полученные результаты могут быть использованы также в машиностроительной промышленности для создания робототехнических полигонов, позволяющих тестировать опытные и серийные образцы роботов. Кроме того, результаты могут применяться для исследований моделей роботов и исследованиях в других областях искусственного интеллекта. Также представленные результаты могут быть использованы для разработки специальных курсов по интеллектуальным системам и робототехнике.

Степень достоверности и апробация результатов. Математические результаты снабжены доказательствами. Теоретические положения подтверждены вычислительными экспериментами. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International Conference on Computer-Aided Design, Manufacturing, Modeling and Simulation (Китай, Ханчжоу, 2011 г.), International Conference on Computer, Informatics, Cybernetics and Applications (Китай, Ханчжоу, 2011 г.), научная сессия МИФИ (Москва, 2008 г., 2009 г.), Межвузовская научная конференция по проблемам информатики СПИСОК-2009 (Екатеринбург, 2009 г.), 42-я и 43-я Всероссийская молодежная школа-конференция (Екатеринбург, 2011 г., 2012 г.).

Результаты исследований представлены на следующих выставках: Международная выставка вооружения «Уралэкспоармс-2008» (Нижний Тагил, 2008 г.), XIV Российский экономический форум «Уралтехно. Наука. Бизнес» (Екатеринбург, 2009 г.), международных выставках «Иннопром» (Екатеринбург, 2010 г., 2012 г., 2013 г.).

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них – 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, 2 – в сборниках научных трудов и тезисов докладов конференций, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 2 патента

на полезные модели. Список работ автора диссертации приведен в конце автореферата. Работы [16–18, 28] не включены в основной список работ, так как в них опубликованы промежуточные результаты. Из работ автора [1, 3–6, 9–14] в диссертацию включены только результаты, принадлежащие диссертанту.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав основного содержания, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций. Общий объём диссертации составляет 118 страниц машинописного текста. Она включает 9 рисунков, 14 таблиц и 131 ссылку на литературные источники.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, описана научная новизна, практическая ценность и основные защищаемые положения. Приводится информация об апробации работы, достоверности полученных результатов, личном вкладе автора и структуре диссертации.

Глава 1. Расстановка датчиков

Проблема расстановки стационарных датчиков берет свое начало из проблемы покрытия множествами — одной из фундаментальных в теории вычислительной сложности и одной из наиболее известных и изучаемых. Практические приложения давно требуют рассмотрения различных модификаций проблемы покрытия, в частности можно отметить Art Gallery Problem. На сегодняшний день по-прежнему предлагаются различные модификации этой проблемы, адаптированные под конкретные прикладные задачи. В диссертации рассматривается модификация данной проблемы, которая наиболее адекватно отвечает требованиям важнейших робототехнических приложений, но при этом остаётся вычислительно-сложной.

Исходя из требований, предъявляемых к робототехническому полигону для проведения интеллектуальных экспериментов, датчики должны осуществлять внешнее наблюдение и предоставлять навигационную информацию. Осуществление таких действий в общем случае может производиться датчиками различных типов. Поэтому размещение датчиков для данных приложений — независимые задачи.

Для осуществления внешнего наблюдения необходимо, чтобы каждая точка полигона обозревалась хотя бы одним датчиком. Отметим, что данная задача является классической для современной компьютерной науки и робототехники (см., например, [22, 40, 42]); в работах [22, 40, 42] представлены приближённые методы её решения. В диссертации представлены алгоритмы для получения точного решения на основе логических моделей. В общем случае данная задача может быть описана следующей математической моделью.

ПРОБЛЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ДАТЧИКОВ (SP)

ДАНО. Дискретное пространство $R \subseteq \mathbf{Z}^2$, множество $N \subseteq R$ возможных мест нахождения робота, множество $S \subseteq R$ возможных мест размеще-

ния датчиков, положительное целое число k и функция обзора датчиком F такая: если точка $y \in R$ обозрима из точки x , то $y \in F(x)$, где $F : S \rightarrow 2^R$.

ЗАДАЧА. Существует ли множество $T \subseteq S$ такое, что $\cup_{x \in T} F(x) = N$ и $|T| \leq k$?

Основным результатом первого раздела первой главы является построение логической модели путем явного сведения SP к задачам выполнимости булевых формул, а именно: к задаче выполнимости булевой формулы в конъюнктивной нормальной форме (SAT), задаче выполнимости булевой формулы в 3-конъюнктивной нормальной форме (3SAT) и задаче максимальной выполнимости булевой формулы в конъюнктивной нормальной форме (MAXSAT). Следует отметить, что на практике необходимо однократное решение задачи SP для каждого полигона. При этом экономия на стоимости даже одного датчика является значимой. Поэтому можно использовать относительно медленные алгоритмы для нахождения оптимального решения. Для проблем MAXSAT, SAT и 3SAT существуют достаточно эффективные алгоритмы (см., например, [26, 39]), позволяющие получать точные решения. Поэтому построение явного сведения SP к MAXSAT, SAT и 3SAT можно рассматривать как эффективное решение проблемы SP.

Рассмотрим сведение SP к MAXSAT. Пусть $S = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ и $N = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. Без потери общности можно предположить, что для любого i существует j такое, что $b_i \in F(a_j)$. Пусть $\alpha_{i,j} = (\bigvee_{l \in \{p | b_i \in F(a_p)\}} x_l) \vee s_j$ и $\beta_{i,j} = (\bigvee_{l \in \{p | b_i \in F(a_p)\}} x_l) \vee \neg s_j$, где $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq m+1$. Пусть

$$\sigma = (\bigwedge_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m+1} (\alpha_{i,j} \wedge \beta_{i,j})) \wedge (\bigwedge_{1 \leq t \leq m} \neg x_t).$$

Теорема SP to MAXSAT. Пусть $\{s_i^0, x_j^0 \mid 1 \leq i \leq m+1, 1 \leq j \leq m\}$ являются заданными для переменных σ такими, что максимальное число операторов σ выполнимы. Пусть $T = \{a_j \mid a_j \in S, x_j^0 = 1\}$. Тогда

$$|T| = \min_{\substack{P \subseteq S \\ \cup_{x \in P} F(x) = N}} |P|.$$

Рассмотрим сведение SP к SAT. Пусть

$$\zeta = \bigwedge_{1 \leq i \leq n} (\bigvee_{l \in \{p | b_i \in F(a_p)\}} x_l) \wedge \bigwedge_{1 \leq i \leq m} (\bigvee_{1 \leq l \leq k} (z_{i,l}) \vee \neg x_i) \wedge \bigwedge_{\substack{1 \leq l \leq k \\ 1 \leq i < j \leq m}} (\neg z_{i,l} \vee \neg z_{j,l}).$$

Теорема SP to SAT. Пусть $\{x_i^0, z_{i,j}^0 \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq k\}$ являются значениями литералов такими, что ζ выполнима. Пусть $T = \{a_i \mid a_i \in S, x_i^0 = 1\}$. Тогда $\cup_{x \in T} F(x) = N$ и $|T| \leq k$.

Используя стандартные преобразования из теории вычислительной сложности, из ζ , которая представлена в конъюнктивной нормальной форме, можно получить 3-конъюнктивную нормальную форму ξ . Таким образом, получаем сведение SP к 3SAT.

Для получения навигационной информации используется метод триангуляции, для которого необходимо, чтобы каждая точка полигона обозреваться как минимум двумя датчиками. До настоящего исследования для решения данной задачи рассматривались только приближённые алгоритмы (см., например, [43]). В диссертации представлен алгоритм для получения точного решения на

основе логической модели. В общем случае данная задача может быть описана следующей математической моделью.

ПРОБЛЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ (SPR)

ДАНО. Дискретное пространство R , функция обзора датчиком F , множество $N = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ возможных мест нахождения робота, множество $S = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ возможных мест размещения датчиков и положительное целое число k .

ЗАДАЧА. Существует ли множество $T \subseteq S$ такое, что $\forall b_l \in N \exists a_i, a_j \in T$ такие, что $i \neq j, b_l \in F(a_i), b_l \in F(a_j)$ и $|T| \leq k$?

Основной результат второго раздела первой главы – построение явного сведения SPR к SAT и 3SAT. Данный подход использован по тем же причинам, что и для задачи SP.

Рассмотрим сведение SPR к SAT. Пусть

$$\begin{aligned}\varphi &= \bigwedge_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq 2}} (\bigvee_{l \in \{p \mid b_i \in F(a_p)\}} x_{i,j,l}) \bigwedge_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq l \leq m}} (\neg x_{i,1,l} \vee \neg x_{i,2,l}); \\ \psi &= \bigwedge_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq 2 \\ 1 \leq l \leq m}} (\bigvee_{1 \leq t \leq k} (z_{l,t}) \vee \neg x_{i,j,l}) \bigwedge_{\substack{1 \leq l \leq k \\ 1 \leq i < j \leq m}} (\neg z_{i,l} \vee \neg z_{j,l}); \\ \zeta &= \varphi \wedge \psi.\end{aligned}$$

Теорема SPR to SAT. Пусть $\{x_{i,j,l}^0, z_{l,t}^0 \mid 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq 2, 1 \leq l \leq m, 1 \leq t \leq k\}$ являются значениями литералов такими, что ζ выполнима. Пусть $T = \{a_l \mid a_l \in S, \exists i, j \ x_{i,j,l}^0 = 1\}$. Тогда $\forall b_l \in N \exists a_i, a_j \in T$ такие, что $i \neq j, b_l \in F(a_i), b_l \in F(a_j)$ и $|T| \leq k$.

Используя аналогичную технику, что и для задачи SP, получаем 3-конъюнктивную нормальную форму для задачи SPR, то есть получаем сведение SPR к 3SAT.

Отметим, если робот является источником информации, то задачи SP и SPR получают иную не менее важную интерпретацию. А именно: решение задачи SP обеспечивает покрытие окружения минимальным количеством информационных концентраторов, а решение задачи SPR даёт возможность получения надежного покрытия окружения. Такой подход представляет существенный интерес и активно изучается [29, 48]. В частности, решение каждой из этих задач в таком контексте представляет значительный интерес для разработки робототехнического полигона, поскольку многие задачи искусственного интеллекта непосредственно связаны со сбором информации, а требование надежности информационного обмена является одним из приоритетных для ряда важнейших направлений использования робототехники и интеллектуальных систем (военные технологии, космонавтика, ликвидация чрезвычайных ситуаций и т.д.).

Для робототехнических полигонов используется идеология разового решения задачи размещения датчиков и дальнейшего многократного его использования. На практике же не всегда имеется возможность подготовить заранее максимально эффективное решение. Поэтому существенный интерес представляет не только нахождение точных решений задачи расстановки датчиков, но

и поиск приближённых решений при помощи быстрых интеллектуальных алгоритмов.

Основным результатом третьего раздела первой главы является построение эффективного интеллектуального алгоритма для приближённого решения проблемы SP. Предложенное решение основано на алгоритме оптимизации искусственной физики, который имеет три стадии: инициализация, вычисление сил и передвижение [47].

На стадии инициализации случайным образом размещаются частицы, а на стадии передвижения происходит их перемещение в результате применения вычисленной силы. Стадии вычисления силы и передвижения повторяются, пока не будет выполнено терминирующее условие. Алгоритм оптимизации искусственной физики настолько эффективен, насколько хорошо подобрана сила.

В диссертации для вычисления сил использовалась нейронная сеть Рунге – Кутты, основанная на многослойном персептроне и идее метода Рунге – Кутты. Данные нейронные сети рассматривались в работе [46]. Взаимосвязь входов и выходов нейронной сети Рунге – Кутты 4-го порядка описывается следующими соотношениями: $y(i+1) = y(i) + \frac{1}{6}h(k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3)$, где $k_0 = N_f(y(i); w)$, $k_1 = N_f(y(i) + \frac{1}{2}hk_0; w)$, $k_2 = N_f(y(i) + \frac{1}{2}hk_1; w)$, $k_3 = N_f(y(i) + hk_2; w)$, $N_f(x; w)$ – нейронная сеть, многослойный персептрон с входом x и весами w . Для обучения использовался алгоритм, который распространяет градиентную ошибку в обратном направлении нейронной сети Рунге – Кутты для минимизации квадратичной ошибки $E = \|x(i+1) - y(i+1)\|^2$ на i -й итерации. Вычислив

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = -2(x(i+1) - y(i+1)) \cdot \frac{1}{6}h\left(\frac{\partial k_0}{\partial w_j} + 2\frac{\partial k_1}{\partial w_j} + 2\frac{\partial k_2}{\partial w_j} + \frac{\partial k_3}{\partial w_j}\right),$$

получаем вектор градиентной ошибки, используемый для обучения нейронной сети.

Глава 2. Планирование движения для определения местоположения

Для автоматического приведения робота в определённое состояние рассматривается проблема локализация. В данной проблеме робот попадает в ситуацию, когда он не знает своего местоположения в известном решетчатом графе. Робот с помощью бортовых датчиков может определить наличие смежных вершин и сместиться в одну из них; он может итеративно передвигаться по графу и производить измерения, чтобы определить свое местоположение.

В первоначальном варианте проблема локализации рассматривалась для определения местоположения робота на хорошо изученной местности, в отсутствие навигационных данных [45]. Отметим, что проблема локализации может возникнуть не только в классическом варианте, но и в других случаях. Например, необходимо (с использованием бортовых датчиков) безаварийно определить ориентацию робота относительно уровня земли.

Рассмотрим задачу поиска оптимального плана локализации, сформулированную в работе [45]. Робот локализован, если известны координаты ячейки, в которой он находится. План локализации определяет набор действий на осно-

ве всех предыдущих передвижений и наблюдений. План локализации является корректным тогда и только тогда, когда независимо от стартовой ячейки он определяет, в какой ячейке находится робот, либо определяет, что локализация невозможна. План локализации может быть подготовлен заблаговременно для известной местности. В случае, если будет использоваться неоптимальный план локализации, то робот будет каждый раз выполнять лишние действия. Задача поиска оптимального плана локализации является вычислительно-сложной, но его использование не требует дополнительных вычислений. В работе [45] представлен приближённый метод решения. В диссертации представлен алгоритм для получения точного решения на основе логической модели. В общем случае данная задача может быть описана следующей математической моделью.

Пусть прямоугольный граф G размера m и n задан матрицей $(g[i, j])_{m+2 \times n+2}$, где $-1 \leq i \leq m$, $-1 \leq j \leq n$. Заметим, что $g[i, j] = 1$ или $g[i, j] = 0$. Случай $g[i, j] = 1$ возможен тогда и только тогда, когда ячейка с координатами i, j принадлежит G . Матрица имеет увеличенный размер, чтобы учесть непроходимость границ графа, то есть $g[i, -1] = 0$, $g[i, n] = 0$ при $-1 \leq i \leq m$ и $g[-1, j] = 0$, $g[m, j] = 0$ при $-1 \leq j \leq n$. Пусть на i -м шаге d_i определяет направление движения (север, восток, юг, запад), где $0 \leq d_i < 4$. Тогда последовательность из i передвижений определим следующим образом: $D_i = [d_0, \dots, d_i]$. Каждый шаг характеризуется некоторым окружением, а именно тем, являются ли соседние ячейки проходимыми или нет. Пусть на i -м шаге w_i показывает проходимость соседних ячеек, где $0 \leq w_i < 16$. Значения w_i вычисляются с помощью функции $t([x, y]) = 1^{g[x+1, y]} + 2^{g[x-1, y]} + 4^{g[x, y+1]} + 8^{g[x, y-1]}$, где $0 \leq x < m$, $0 \leq y < n$. Также определим последовательность проходимости соседних ячеек: $W_i = [w_0, \dots, w_i]$. Таким образом, можно задать план локализации с помощью функции $f(W_i, D_{i-1})$, которая на i -м шаге вычисляет направление движения d_i . Пусть $F(W_i) = F(W_{i-1}) \cup [f(W_i, F(W_{i-1}))]$ и $F(W_0) = [f(W_0, [])]$. Определим функцию $q([x, y], D_i)$, которая возвращает координаты ячейки при старте из ячейки $g[x, y]$ и выполнении последовательности передвижений D_i . Определим функцию $T([x, y], D_i) = [t([x, y]), t(q([x, y], D_0), \dots, t(q([x, y], D_i))]$, которая возвращает последовательность масок проходимых ячеек при выполнении последовательности передвижений D_i , где $D_i = D_{i-1} \cup d_i$. Таким образом, можно определить функцию $h(W_i, D_{i-1}) = \{q([x, y], D_{i-1}) | g[x, y] = 1, T([x, y], D_{i-1}) = W_i\}$, которая определяет множество ячеек, где может находиться робот при выполнении последовательности передвижений D_{i-1} , наблюдая при этом последовательность проходимости соседних ячеек W_i .

ПРОБЛЕМА КОРРЕКТНОГО ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ПЛАНА ЛОКАЛИЗАЦИИ (VDLPP)

ДАНО. Прямоугольный граф G , натуральное число K .

ЗАДАЧА. Существует ли $f(W_i, D_{i-1})$ такой, что для $\forall W_K = [w_0, \dots, w_{k-1}, w_k]$ и $W_{K-1} = [w_0, \dots, w_{k-1}]$: $|h(W_K, F(W_{K-1}))| \leq 1$?

Основным результатом второй главы является построение явного сведения VDLPP к SAT. Задача VDLPP на практике требует однократного решения для

каждого полигона и может быть решена заблаговременно до непосредственного использования плана локализации. Построение явного сведения VDLPP к SAT можно рассматривать как эффективное решение проблемы VDLPP.

Рассмотрим сведение VDLPP к SAT. Пусть $W = \{(x, y) | g[x, y] = 1\}$, $V = \{(x, y) | g[x, y] = 0\}$. Определим функции: $f_x(d)$ и $f_y(d)$ такие, что $f_x(1) = 0$, $f_x(2) = 0$, $f_x(3) = -1$, $f_x(4) = 1$ и $f_y(1) = 1$, $f_y(2) = -1$, $f_y(3) = 0$, $f_y(4) = 0$. Определим литералы, истинность которых имеет следующее значение: $s_{x_0, y_0, x_1, y_1, l}$ — истинно, если робот при старте из ячейки x_0, y_0 на шаге l приходит в ячейку x_1, y_1 ; $a_{x_0, y_0, l, h}$ — истинно, если робот при старте из ячейки (x_0, y_0) на шаге l может находиться в любой ячейке из множества с порядковым номером h ; $b_{l, g, h}$ — истинно, если на шаге l множество g является подмножеством множества h с шага $l - 1$; $c_{x_0, y_0, l, d}$ — истинно, если при старте робота из ячейки (x_0, y_0) на шаге l выбрано направление движение d , где $1 \leq d \leq 4$ и направление движения регламентируется функциями: $f_x(d)$ и $f_y(d)$; $e_{x, y, d}$ — истинно, если ячейка (x, y) имеет конфигурацию стенок d , где $0 \leq d < 2^4$ и конфигурация стенок регламентируется функцией $t(x, y)$. Чтобы литералы удовлетворяли заявленному смыслу и отвечали условиям задачи VDLPP, определим следующую формулу: $\varphi = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \beta_1 \wedge \beta_2 \wedge \delta \wedge \gamma_1 \wedge \gamma_2 \wedge \eta_1 \wedge \eta_2 \wedge \eta_3 \wedge \lambda$, где

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \bigwedge_{\substack{0 \leq q \leq 2, (x_q, y_q) \in W, (x_1, y_1) \neq (x_2, y_2) \\ x_2 \geq x_1, y_2 \geq y_1, 0 \leq l \leq k}} (\neg s_{x_0, y_0, x_1, y_1, l} \vee \neg s_{x_0, y_0, x_2, y_2, l}); \\ \alpha_2 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ 0 \leq l \leq k}} (\bigvee_{(x_1, y_1) \in W} (s_{x_0, y_0, x_1, y_1, l})) \bigwedge_{(x_0, y_0) \in W} (s_{x_0, y_0, x_0, y_0, 0}); \\ \beta_1 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ 0 \leq l < k}} (\bigvee_{1 \leq d \leq 4} (c_{x_0, y_0, l, d})) \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W, 0 \leq l < k \\ 1 \leq d < q \leq 4}} (\neg c_{x_0, y_0, l, d} \vee \neg c_{x_0, y_0, l, q}); \\ \beta_2 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in W \\ 0 \leq l < k, 1 \leq d \leq 4}} (\neg c_{x_0, y_0, l, d} \vee \neg s_{x_0, y_0, x_1, y_1, l} \vee s_{x_0, y_0, x_1 + f_x(d), y_1 + f_y(d), l+1}); \\ \delta &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ 0 \leq l \leq k}} (\bigvee_{0 \leq h \leq n*m} (a_{x_0, y_0, l, h})) \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W, 0 \leq l \leq k \\ 0 \leq h < g \leq n*m}} (\neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_0, y_0, l, g}); \\ \gamma_1 &= \bigwedge_{\substack{1 \leq l \leq k \\ 0 \leq g \leq n*m}} (\bigvee_{0 \leq h \leq n*m} (b_{l, g, h})) \bigwedge_{\substack{1 \leq l \leq k, 0 \leq g \leq n*m \\ 0 \leq h < p \leq n*m}} (\neg b_{l, g, h} \vee \neg b_{l, g, p}); \\ \gamma_2 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ 1 \leq l \leq k \\ 0 \leq g, h \leq n*m}} ((\neg b_{l, g, h} \vee a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_0, y_0, l+1, g}) \wedge (\neg b_{l, g, h} \vee \neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee a_{x_0, y_0, l+1, g})); \\ \eta_1 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ d = t(x_0, y_0)}} (e_{x_0, y_0, d}) \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ 0 \leq d < 16 \\ d \neq t(x_0, y_0)}} (\neg e_{x_0, y_0, d}) \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ (x_1, y_1) \in V \\ 0 \leq l \leq k}} (\neg s_{x_0, y_0, x_1, y_1, l}); \\ \eta_2 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in W \\ (x_0, y_0) \neq (x_1, y_1), x_1 \geq x_0, y_1 \geq y_0 \\ 0 \leq l \leq k, 1 \leq d \leq 4, 0 \leq h \leq m*n}} ((\neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_1, y_1, l, h} \vee c_{x_0, y_0, l, d} \vee \neg c_{x_1, y_1, l, d}) \wedge (\neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_1, y_1, l, h} \vee \neg c_{x_0, y_0, l, d} \vee c_{x_1, y_1, l, d})); \\ \eta_3 &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in W \\ (x_0, y_0) \neq (x_1, y_1), x_1 \geq x_0, y_1 \geq y_0 \\ 0 \leq l \leq k, 0 \leq d < 16, 0 \leq h \leq m*n}} ((\neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_1, y_1, l, h} \vee e_{x_0, y_0, d} \vee \neg e_{x_1, y_1, d}) \wedge (\neg a_{x_0, y_0, l, h} \vee \neg a_{x_1, y_1, l, h} \vee \neg e_{x_0, y_0, d} \vee e_{x_1, y_1, d})); \\ \lambda &= \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0) \in W \\ d = t(x_0, y_0) \\ l = 0}} (a_{x_0, y_0, l, d}) \bigwedge_{\substack{(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in W \\ (x_1, y_1) \neq (x_0, y_0), x_1 \geq x_0, y_1 \geq y_0 \\ 0 \leq h \leq n*m}} (\neg a_{x_0, y_0, k, h} \vee \neg a_{x_1, y_1, k, h}). \end{aligned}$$

Теорема VDLPP to SAT. Пусть $T = \{s_{x_0,y_0,x_1,y_1,l}^0 \mid -1 \leq x_0, x_1 \leq n; -1 \leq y_0, y_1 \leq m; 0 \leq l \leq k\} \cup \{a_{x,y,l,h}^0 \mid 0 \leq x < n; 0 \leq l \leq k; 0 \leq y < m; 0 \leq h \leq n*m\} \cup \{b_{l,g,h}^0 \mid 1 \leq l \leq k; 0 \leq g, h \leq n*m\} \cup \{c_{x,y,l,d}^0 \mid 0 \leq x < n; 0 \leq l < k; 0 \leq y < m; 1 \leq d \leq 4\} \cup \{e_{x,y,d}^0 \mid 0 \leq x < n; 0 \leq d < 16; 0 \leq y < m\}$ являются значениями литералов такими, что φ выполнима. Тогда существует план локализации для графа G , длина которого не более k .

Таким образом, получаем сведение задачи VDLPP к SAT. Используя аналогичную технику, что и для задачи SP, получаем 3-конъюнктивную нормальную форму для задачи VDLPP, то есть получаем сведение VDLPP к 3SAT.

Глава 3. Самосознание

Для выявления нештатных ситуации, возникающих в результате проведения эксперимента на робототехническом полигоне, используется система, которая следит за совокупным состоянием робота. Подобную систему в называют системой самосознания. Возникновение нештатных ситуаций может происходить в результате внешних или внутренних аномалий.

Внешние аномалии происходят в результате взаимодействия робота с внешним миром. В данном случае для компенсации непредвиденных технических неисправностей робот должен анализировать связь между отданными командами и фактическим их исполнением. Существующие модели самосознания могут оперировать лишь малым набором простейших временных отношений (см., например, [19, 33]), что ограничивает возможности системы самосознания. Такое ограничение обусловлено открытой проблемой компактного представления пространства «состояния-действия».

В диссертации предложен принципиально новый подход, позволяющий компактно представлять элементы данного пространства. Рассмотрим модель, предложенную в диссертации. Пусть $\mathcal{X} = \{x_i \mid x_i \text{ является переменной, } i \in I\}$, где I — некоторое индексное множество. Рассмотрим временные ряды $x = (x_1, \dots, x_{|I|})$.

Как правило, существует некоторый временной интервал, который определяет смысловые границы всех событий. Соответственно, можно предположить, что существует некоторое положительное целое число n такое, что для любого t значение $x_i[s]$, где $s > t + n$ или $s < t - n$, не влияет на осведомленность о ситуации в момент t . Теперь можно дать новое определение временной связи. Любые временные отношения могут быть определены как временные ряды y такие, что $y = (y_1, y_2, \dots, y_{|I|})$, где $y_i[s] = 0$, если $x_i[s] = 0$; $y_i[s] = 0$, если $s > t + n$ или $s < t - n$; $y_i[s] \in \{0, 1\}$, если $x_i[s] = 1$ и $t - n \leq s \leq t + n$ для некоторого t .

Предложенная модель наследуют все хорошие свойства временных отношений из работ [19, 33], но при этом компенсирует их недостатки. Однако данная модель имеет много временных отношений. Чтобы уменьшить влияние количества временных отношений на производительность системы управления роботом, в исследованиях использовалась алгебра на множестве временных отношений для структурирования особенностей и объединения элементарных событий.

Определим алгебраические операции \star на множестве временных отношений следующим образом. Пусть $u \star v = z$, где $z_i[t] = 1$ тогда и только тогда, когда $u_i[t] = 1$ или $v_i[t] = 1$ для всех t . Для произвольных временных рядов x_i можно рассмотреть $x_i[t]$ как элементарное событие. Результат работы учитывает все элементарные события, которые принимаются во внимание хотя бы одним из операндов.

Пусть \mathcal{R} — множество всех временных отношений. Пусть $R \subseteq \mathcal{R}$. Легко проверить, что $\mathcal{S} = \langle R \mid \star \rangle$ является полугруппой для любого $R \neq \emptyset$. Теперь вместо множества всех временных отношений можно рассматривать только набор системообразующих генераторов полугруппы \mathcal{S} . Оставшиеся отношения можно получить с помощью операции \star . В частности, при использовании на работе можно определить семантику только для генераторов полугрупп. Семантика оставшихся отношений будет непосредственно следовать из семантики генераторов и разложения. Такой подход позволяет использовать понятия «статус» и «диаметр» алгебры, чтобы регулировать отношение между числом предоставленной информации и сложностью представления (см., например, [25, 37]).

Дальнейшее сокращение числа временных отношений, семантика которых определена, возможно при объединении элементарных событий. Например, робот оснащен двумя веб-камерами. Рассмотрим следующие элементарные события: «робот находится не на столе» и «человек находится рядом с роботом».

Для первой веб-камеры определим события u_1 и u_2 , а для второй — события v_1 и v_2 соответственно. Чтобы быть уверенным, что одно из представленных событий происходит в момент времени t , достаточно, чтобы выполнялось одно из следующих отношений: $u_i[t] = 1$, $v_i[t] = 1$. Такая ситуация довольно распространена. Соответственно, возможно использование следующей операции объединения элементарных событий: $u \star v = 1$ тогда и только тогда, когда $u = 1$ или $v = 1$.

Во многих случаях интересно использовать другой подход. Например, для первой камеры определяем элементарное событие «человек удерживает робота правой рукой». Для второй камеры определяем элементарное событие «человек удерживает робота левой рукой». Если требуется выполнение обоих отношений, тогда получим новое отношение — «человек удерживает робота двумя руками».

Для изучения эффекта от действий робота необходимо установить соответствие между действиями робота и некоторыми шаблонами. Соответствия определяются с помощью временных отношений. Распространённым способом выбора шаблонов является выбор наиболее часто встречающихся шаблонов; использование временных отношений для выбора шаблонов является последовательностью на основе временных отношений. В проводимых экспериментах для первоначального распознавания событий использовались интеллектуальные системы, основанные на нейронных сетях и пороговых схемах. Выбор шаблона производился при использовании техники наибольшей общей подпоследовательности, опираясь на максимальную последовательность, в которой производится поиск длинной последовательности, являющейся подпоследовательностью или

общей подпоследовательностью для всех последовательностей в множестве последовательностей.

Определение наибольшей общей подпоследовательности с максимальной последовательностью возможно несколькими способами. Длина последовательности S — количество букв в ней — обозначается как $|S|$. Дано множество последовательностей $\mathcal{S} = \{S_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ и последовательность T в каком-то фиксированном алфавите Σ , последовательность T является подпоследовательностью последовательности S_i , если T может быть получена из S_i путём удаления некоторых букв из S_i . Последовательность T является наибольшей общей подпоследовательностью множества последовательностей \mathcal{S} , если T может быть получена из S_i путем удаления некоторых букв из S_i для всех таких i , что $1 \leq i \leq m$. Последовательность T является наибольшей общей подпоследовательностью \mathcal{S} , если T является общей подпоследовательностью \mathcal{S} , и если U является общей подпоследовательностью \mathcal{S} , то $|U| \leq |T|$. Последовательность $T \in \mathcal{T}$ является наибольшей общей подпоследовательностью \mathcal{S} над множеством \mathcal{T} , если T является общей подпоследовательностью \mathcal{S} , и если $U \in \mathcal{T}$ является общей подпоследовательностью \mathcal{S} , то $|U| \leq |T|$. В частности, ясно, что наибольшей общей подпоследовательностью \mathcal{S} является наибольшая общая подпоследовательность \mathcal{S} над множеством \mathcal{T} , где $\mathcal{T} = \Sigma^*$.

В исследовании не ставилась задача определить, какой из представленных методов работает лучше всего в общем случае. Необходимо просто найти последовательность, которая наилучшим образом подходит для действий робота в рассматриваемом случае. Для повышения вычислительной производительности естественным является использование генетического алгоритма для выбора правильного метода.

Идентификация внутренних аномалий полностью происходит только за счёт внутренней сенсорной информации. Другой информацией, относящейся к внутренним аномалиям, робот не обладает. Поэтому выявление подобных аномалий основано на внутренних состояниях, которые базируются на внутренней сенсорной информации. В некоторых работах используют внутренние состояния, копирующие человеческие [31, 41]. Но больший интерес представляют машинно-ориентированные состояния, которые лучше отражают специфику робота. В диссертации разработана модель машинно-ориентированных внутренних состояний.

Данная модель основана на базе механизма работы интронов и экзонов в биологической модели генетического алгоритма. Экзоны используются непосредственно для синтеза белков. Хотя интроны не кодируют белковой информации, они тоже имеют весьма существенное значение для синтеза белков. В частности, в интронах закодированы многие генетические болезни (в том числе препятствующие синтезу отдельных белков или, наоборот, стимулирующие синтез). В ходе анализа функций интронов в биологической модели были выделены следующие роли интронов, представляющие интерес.

«Связность» генов. Возникают ситуации, когда определённые гены хорошо проявляют себя в совокупности, а по отдельности они не влияют на положительные качества системы.

Статистический контейнер. С помощью интронов появляется возможность сохранять статистическую информацию о гене из предыдущих поколений.

История изменений. В ходе работы генетического алгоритма с генами происходят изменения, которые сами по себе несут полезную информацию.

В зависимости от выбранной стратегии влияния на работу эволюционного процесса, на определённых шагах генетического алгоритма происходит их корректировка с учётом наличия интронов. С точки зрения хранения, интроны удобно рассматривать как множество объектов. На каждом шаге алгоритма используются только те объекты из множества, с которыми шаг алгоритма умеет работать, а остальные просто игнорируются. Предложенная модель использовалась для проведения экспериментов конфигурирования управляющей системы. Внутренние состояния, с одной стороны, отслеживали качество получаемых решений некоторой задачи, а с другой, объём используемых вычислительных ресурсов.

Глава 4. Программный комплекс

Для проведения тестирования полученных математических моделей и алгоритмов в рамках решения первых трёх задач разработан программный комплекс, который обеспечивает интеграцию с элементами робототехнического полигона. В частности, он интегрирован с системами управления двух реальных роботов. Данный комплекс позволяет проводить тестирование в рамках исследуемой проблематики.

В первом разделе четвертой главы рассмотрены вопросы выбора вычислительных платформ в зависимости от решаемой задач. Программный комплекс использует три вычислительные платформы: бортовой компьютер, управляющий компьютер, суперкомпьютер, что позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные ресурсы при решении рассматриваемых задач.

Во втором разделе четвертой главы проведено тестирование математических моделей для проблемы SP с помощью различных эвристических алгоритмов: fgrasp [39], posit [39], GA [4], SGA [27], OA [27], A1 [26], A2 [36], A3 [35], A4 [34]. Результаты тестирования представлены в таблице 1. Для SAT сведения проблемы SPP в таблице 2 представлено сравнение алгоритмов. Также было проведено тестирование приближённого интеллектуального алгоритма для проблемы SP при различных условиях $V_1(\frac{5 \cdot 10^2 \leq N \leq 10^3}{10^2 \leq S \leq 5 \cdot 10^2})$, $V_2(\frac{5 \cdot 10^3 \leq N \leq 10^4}{10^3 \leq S \leq 5 \cdot 10^3})$ и $V_3(\frac{5 \cdot 10^4 \leq N \leq 10^5}{10^4 \leq S \leq 5 \cdot 10^4})$. В таблице 3 представлена оценка качества алгоритмов $M_A = \frac{T_A}{T_{\text{opt}}}$, где T_{opt} — количество датчиков наилучшего решения задачи SP, полученного SAT-решателем, а T_A — количество датчиков решения задачи SP алгоритмом A. В качестве алгоритмов выступают: закон негативной экспоненциальной силы (NEFL) [47], закон унимодальной силы (UFL) [47], закон линейной силы (LFL) [47] и предложенный в диссертации закон общей силы (RKFL) на

основе нейронной сети Рунге – Кутты. Кроме того, рассмотрены приложения результатов по проблемам SP и SPP для решения конкретной прикладной задачи. А именно: рассмотрена задача информационного покрытия для обеспечения мониторинга пассажиропотока на транспорте. Рассмотрение этой задачи представляет особый интерес с точки зрения проблематики, представленной в диссертации, поскольку она позволила опробовать в реальном окружении все аспекты сенсорного обеспечения окружения (покрытие минимальным количеством сенсоров-наблюдателей, размещение навигационных сенсоров, размещение сенсоров для сбора информации).

Таблица 1 – Экспериментальные результаты для SP Таблица 2 – Экспериментальные результаты для SPP

Алгоритм	Среднее	Макс.	Лучшее
3SAT			
fgrasp	38,1 мин	11,27 ч	2,12 мин
posit	42,32 мин	8,26 ч	2,97 мин
SGA	1,14 ч	21,84 ч	2,17 мин
OA	17,77 мин	8,18 ч	19 с
A2	19,44 мин	6,38 ч	11,2 с
A3	4,07 мин	41,62 мин	1,1 мин
A4	6,15 мин	4,2 ч	6 с
MAXSAT			
A1	6,19 мин	12,74 м	1,5 мин
SGA	52,1 мин	21,3 ч	53 с
OA	32,16 мин	17,6 ч	11 с

Алгоритм	Среднее	Макс.	Лучшее
fgrasp	2,56 ч	7,11 ч	22,3 мин
posit	2,43 ч	9,48 ч	28,7 мин
GA	2,19 ч	6,2 ч	53,55 с
A2	39,72 мин	3,79 ч	15,88 с
A3	5,7 мин	26,1 м	45,9 с
A4	14,55 мин	1,78 ч	7,41 с

Таблица 3 – Результаты тестирования приближённого интеллектуального алгоритма

	V_1	V_2	V_3
M_{NEFL}	1,542	1,789	2,116
M_{UFL}	1,873	2,442	3,715
M_{LFL}	2,292	3,788	5,204
M_{RKFL}	1,076	1,138	1,157

В третьем разделе четвертой главы описано тестирование SAT-представления для проблемы VDLPP. В таблице 4 приведены результаты сравнения различных эвристических алгоритмов для данного сведения. Отметим, что специфика разных сведений для некоторой задачи может кардинально менять эффективность работы определённого эвристического алгоритма. Поэтому полученные в диссертации сведения с практической точки зрения представляют интерес только в совокупности с эвристическими алгоритмами, которые успешно их решают.

Таблица 4 – Экспериментальные результаты для VDLPP

Время	Среднее	Макс.	Лучшее
fgrasp	3,24 ч	26,73 ч	18,9 мин
posit	4,61 ч	19,57 ч	9,44 мин
A2	1,33 ч	3,72 ч	5,3 с
A3	11,25 мин	56,43 мин	2,81 м
A4	22,5 мин	37,8 мин	3,4 с

Таблица 5 – Экспериментальное сравнение алгебр отношений

Используемая алгебра	A [19]	CA [33]	PA
Достижение конечной точки маршрута, %	74	52	96
Среднее время прохождения дистанции, мин	7,43	11,8	4
Кол-во достигнутых контрольных точек	97	56	186
Средняя длина пройденного маршрута, м	63	47	97

В четвертом разделе четвертой главы представлены результаты тестирования системы самосознания. В таблице 5 приведены результаты экспериментального сравнения выявления внешних аномалий предложенной в диссертации расширенной алгебры (РА) с другими алгебрами. Также проведено тестирование расширенного генетического алгоритма, который для минимизации внутренних

аномалий оптимизировал вычислительную нагрузку программных подсистем робота в зависимости от решаемой задачи.

Основные результаты и выводы

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов и математических моделей для обеспечения интеллектуального эксперимента. В рамках поставленной цели были получены следующие результаты.

1. Разработаны алгоритмы размещения датчиков для исследовательского окружения робота. Для проблемы размещения датчиков, осуществляющих внешнее наблюдение (SP), предложены сведения к проблемам SAT, 3SAT и MAXSAT. Для задачи размещения навигационных датчиков (SPP) предложены сведения к проблемам SAT и 3SAT. Предложенные сведения позволяют с помощью эвристических алгоритмов получать точные решения за разумное время. Для решения проблемы (SP) в ограниченное время разработан интеллектуальный алгоритм, основанный на использовании модели искусственной физики и нейронных сетей Рунге – Кутты.
2. Разработан алгоритм построения оптимального плана локализации. В частности, представлены сведения проблемы построения корректного детерминированного плана локализации (VDLPP) к проблемам SAT и 3SAT, позволяющие получать оптимальные решения с помощью эвристических алгоритмов.
3. Разработана модель самосознания робота, анализирующая внешние и внутренние аномалии. Для анализа внешних аномалий разработана алгебра временных отношений, использующая принципиально новый подход для описания пространства «состояния-действия». Для анализа внутренних аномалий предложен расширенный генетический алгоритм, имеющий память о предыдущих своих итерациях.
4. Разработан программный комплекс, реализующий полученные математические модели, алгоритмы и обеспечивающий их интеграцию с элементами робототехнического полигона. С помощью данного комплекса проведено экспериментальное тестирование, которое показало высокую эффективность предложенного математического аппарата.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ

1. Брусянин Д. А., Вихарев С. В., Шека А. С. Интеллектуальная система анализа пассажиропотоков с использованием технического зрения // Транспорт Урала. 2012. Т. 2(33). С. 86–89.
2. Шека А. С. Экспериментальный анализ алгебр отношений для идентификации отказов мобильных роботов // Транспорт Урала. 2013. Т. 3(38). С. 53–57.
3. Gorbenko A., Mornev M., Popov V., Sheka A. The problem of sensor placement // Advanced Studies in Theoretical Physics. 2012. Vol. 6. No. 20. P. 965–967.
4. Gorbenko A., Mornev M., Popov V., Sheka A. The problem of sensor placement for triangulation-based localisation // International Journal of Automation and Control. 2011. Vol. 5. No. 3. P. 245–253.
5. Gorbenko A., Popov V., Sheka A. Robot self-awareness: Exploration of internal states // Applied Mathematical Sciences. 2012. Vol. 6. No. 14. P. 675–688.
6. Gorbenko A., Popov V., Sheka A. Robot self-awareness: Temporal relation based data mining // Engineering Letters. 2011. Vol. 19. No. 3. P. 169–178.
7. Sheka A. On the Valid Deterministic Localization Plan Problem // Applied Mathematical Sciences. 2013. Vol. 7. No. 97. P. 4829–4838.
8. Sheka A. Problems of Sensor Placement for Intelligent Environments of Robotic Testbeds // International Journal of Mathematical Analysis. 2013. Vol. 7. No. 47. P. 2333–2339.

Другие публикации

9. Брусянин Д. А., Вихарев С. В., Горбенко А. А., Попов В. Ю., Шека А. С. Интеллектуальная система мониторинга пассажиропотока транспортного комплекса региона // Инновационный транспорт. 2012. Т. № 2(3). С. 41–43.
10. Горбенко А. А., Морнев М. Л., Попов В. Ю., Шека А. С. Об организации стационарного визуального наблюдения // Материалы всероссийской молодежной школы-конференции «Современные проблемы математики» (31.01.2011 – 6.02.2011). С. 311–314.
11. Горбенко А. А., Попов В. Ю., Шека А. С. Автономное подключение к источникам питания для мобильных роботов // Материалы всероссийской молодежной школы-конференции «Современные проблемы математики» (29.01.2012 – 5.02.2012). С. 214–216.

Патенты и свидетельства о регистрации программ

12. Брусянин Д. А., Вихарев С. В., Горбенко А. А., Попов В. Ю., Шека А. С. Интеллектуальная система мониторинга пассажиропотока с использованием технического зрения // Патент на полезную модель №121628 (РФ) от 27.10.2012.
13. Вихарев С. В., Шека А. С. Система управления мобильным роботом // Патент на полезную модель №123362 (РФ) от 27.12.2012.
14. Горбенко А. А., Шека А. С. Управляющая программа гусеничного робота Kuzma-II // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012616119 от 4.06.2012.
15. Шека А. С. Управляющая программа колесного робота Kuzma-I // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611028 от 24.01.2012.

Литература

16. Бабинов А. Б., Морнев М. Л., Окуловский Ю. С. и др. Об интеллектуальных алгоритмах управления роботами // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. Вып. 4. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2008. С. 169–175.
17. Морнев М. Л., Окуловский Ю. С., Попов В. Ю., Шека А. С. Проблемы интеллектуального моделирования колесных роботов // Международная научная конференция «Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании». Тезисы докладов. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2007. С. 229–231.
18. Окуловский Ю. С., Шека А. С. Об архитектуре роботов и интеллектуальном управлении ими // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. Т. 48. С. 143–150.
19. Allen J. F. An Interval-Based Representation of Temporal Knowledge // Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 1. 1981. Vol. 1. P. 221–226.
20. Andersen G., Burnheimer A., Cicirello V. et al. Intelligent systems demonstration: The Secure Wireless Agent Testbed (SWAT) // Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence. 2004. P. 1004–1005.
21. Artificial Intelligence Journal. URL: <http://www.journals.elsevier.com/artificial-intelligence/> (дата обращения: 17.09.2012).
22. Efrat A., Har-Peled S., Mitchell J. Approximation algorithms for two optimal location problems in sensor networks // Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks, Boston, Massachusetts, USA. 2005. Vol. 1. P. 714–723.
23. Eurobot. URL: <http://www.eurobot.org/> (дата обращения: 16.03.2012).
24. Fernanda B., Garcia F., Takada I. et al. Development of a testbed to intelligent systems on software defined radio // SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings. 2005. P. 259–262.
25. Gorbenko A., Lutov A., Mornev M., Popov V. Algebras of stepping motor programs // Applied Mathematical Sciences. 2011. Vol. 5. No. 33–36. P. 1679–1692.
26. Gorbenko A., Popov V. A genetic algorithm with expansion and exploration operators for the maximum satisfiability problem // Applied Mathematical Sciences. 2013. Vol. 7. No. 21–24. P. 1183–1190.
27. Gorbenko A., Popov V. SAT solvers for the problem of sensor placement // Advanced Studies in Theoretical Physics. 2012. Vol. 6. No. 25–28. P. 1235–1238.
28. Gorbenko A., Popov V., Sheka A. Localization on discrete grid graphs // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 107. P. 971–978.
29. Han X., Cao X., Lloyd E., Shen C.-C. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2010. Vol. 9. No. 5. P. 643–656.
30. ISHM Testbeds and Prototypes. URL: http://csrp.psu.edu/files/ishm2005/ishm_duncavage.pdf (дата обращения: 15.01.2010).
31. Lee-Johnson C., Carnegie D. Mobile robot navigation modulated by artificial emotions // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2010. Vol. 40. No. 2. P. 469–480.
32. McCulloch W., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. Vol. 5. No. 4. P. 115–133.
33. Oates T., Cohen P. Learning planning operators with conditional and probabilistic effects // Planning with Incomplete Information for Robot Problems: Papers from the 1996 AAAI Spring Symposium. 1996. P. 86–94.
34. Popov V. A genetic algorithm with expansion operator for the 3-satisfiability problem // Advanced Studies in Theoretical Physics. 2013. Vol. 7. No. 5–8. P. 359–361.
35. Popov V. Genetic algorithms with exons and introns for the satisfiability problem // Ad-

- vanced Studies in Theoretical Physics. 2013. Vol. 7. No. 5–8. P. 355–358.
36. Popov V. GSAT with adaptive score function // Advanced Studies in Theoretical Physics. 2013. Vol. 7. No. 5–8. P. 363–366.
 37. Popov V. Sorting by prefix reversals // IAENG International Journal of Applied Mathematics. 2010. Vol. 40. No. 4. P. 1–4.
 38. Robocup. URL: <http://www.robocup.org/> (дата обращения: 07.06.2013).
 39. SAT solvers. URL: <http://people.cs.ubc.ca/~hoos/SATLIB/index-ubc.html> (дата обращения: 12.08.2010).
 40. Spletzer J., Taylor C. Dynamic sensor planning and control for optimally tracking targets // International Journal of Robotics Research. 2003. Vol. 22. No. 1. P. 7–20.
 41. Sumpeno S., Hariadi M., Purnomo M. Facial emotional expressions of life-like character based on text classifier and fuzzy logic // IAENG International Journal of Computer Science. 2011. Vol. 38. No. 2. P. 122–133.
 42. Susca S., Bullo F., Martinez S. Monitoring environmental boundaries with a robotic sensor network // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2008. Vol. 16. No. 2. P. 288–296.
 43. Tekdas O., Isler V. Sensor placement for triangulation-based localization // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2010. Vol. 7. No. 3. P. 681–685.
 44. The Connected Vehicle Test Bed. URL: http://www.its.dot.gov/factsheets/connected_vehicle_testbed_factsheet.htm (дата обращения: 08.04.2012).
 45. Tovey C., Koenig S. Gridworlds as testbeds for planning with incomplete information // Proceedings of the seventeenth national conference on artificial intelligence. 2000. P. 819–824.
 46. Wang Y.-J., Lin C.-T. Runge Kutta Neural Network for identification of continuous systems // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1998. Vol. 4. P. 3277–3282.
 47. Xie L., Zeng J. The performance analysis of artificial physics optimization algorithm driven by different virtual forces // ICIC Express Letters. 2010. Vol. 4. No. 1. P. 239–244.
 48. Zhang W., Xue G., Misra S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Problems and algorithms // Proceedings - IEEE INFOCOM. 2007. P. 1649–1657.